

지 반 공 학

분열 프랙탈을 이용한 다짐 에너지의 영향 분석

- 입도, 다짐도 및 투수특성을 중심으로 -

Analysis of Effect of Compaction Energy on Characters of Grain Size Distribution, Compaction and Permeability Using Fragmentation Fractal

노수각** · 손영환*† · 장병욱*** · 김성필****

Noh, Soo Kack · Son, Young Hwan · Chang, Pyoung Wuck · Kim, Seong Pil

Abstract

Particles of soil are crushed when soil is compacted in the in-situ or lab. Among many factors that affect the crush of particles, compaction energy is a major factor. Because the crush of particles can change physical properties, the analysis of effect of compaction energy is very important. In this study, the fragmentation fractals were used for determining the change in grain size distribution and the effect due to change in grain size distribution was estimated. Compaction energy was increased by 50, 100, 200 and 300% based on the energy of standard A compaction test. As a result, grain size distribution curves were changed and fine particles increased as compaction energy were increased. Relative compaction were ranged between 93.38~107.67. Fractal dimension of each site increased as compaction energy increased. Relative compaction is proportional to the fractal dimension but coefficients of permeability were in inverse proportional to the involution of fractal dimension.

Keywords : Compaction energy, Fractal dimension, Grain size distribution, Permeability, Relative compaction

I. 서 론

토립자는 비압축성, 비파쇄성인 재료로 가정하고 있으나 실제 현장이나 실내 다짐 시험 시, 구속압력이나 파괴하중에 따라 파쇄가 발생하게 된다. 입자의 파쇄는 풍화도, 입도분포, 입경모양, 입자강도, 함수비와 압력이나 다짐 에너지 등의 영향을 받게 되는데 이중 다짐 에너지는 입자의 파쇄에 직접적인 영향을 주게 되며 그 크기에 따라 파쇄성질이 달라진다. 입자의 파쇄는 입도분포, 투수계수 내부

* 서울대학교 대학원 박사

** 서울대학교 대학원 석사과정

*** 서울대학교 조경·지역시스템공학부
지역시스템공학 전공 교수

**** 서울대학교 대학원 박사

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593
Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: syh86@snu.ac.kr

마찰각 등 토질의 공학적 성질에 영향을 미치게 된다(김 등, 1995; 박 등, 1998; 이, 1983; Fukumoto, 1992). 이러한 공학적 성질의 변화는 지반 안정에 영향을 미치게 되므로 입자의 파쇄에 대한 다짐 에너지의 영향 파악이 중요하다.

기존 연구에서는 입도분포의 영향파악에 있어 입도분포곡선을 정량적으로 표현하기 위하여 일부 입경만을 고려하는 균등지수, 곡률계수, 유효입경 등을 산정하여 사용하였고 파쇄성 판정에도 일부 입경만을 고려하였기 때문에 전체적인 모양을 고려하기 힘들다(민 등, 2004; 박, 2005). 또한 투수계수 변화 파악에 있어서도 투수모드에 다짐 에너지를 다르게 하여 직접 다지기 때문에 다짐 에너지에 따른 입도분포의 변화뿐 아니라 간극비, 단위중량 등의 조건도 달라져 입도변화의 영향만을 고려할 수 없다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 극복하고자 입도분포곡선의 전체적인 모양을 반영할 수 있는 지수인 프랙탈 차원의 적용이 시도되고 있다. 프랙탈 차원은 공학적 성질과 입도분포특성과의 관계를 분석하는데도 용이하여 많은 연구가 이루어 졌다. Bonala and Reddi(1999)는 프랙탈 차원을 이용하여 시료의 크기와 점착력과의 관계를 연구하였고 Gori and Mari(2001)는 조립토의 내부 마찰각과 프랙탈 차원과의 관계를 연구하였다. 박(2005)은 입도분포곡선으로 구해진 프랙탈 차원을 이용한 투수계수 예측식을 개발하였다.

본 연구에서는 다짐 에너지가 입도에 미치는 영향을 파악하기 위해 프랙탈 차원을 이용하여 입도분포곡선을 분석하였다. 또한 간극비와 건조단위중량을 일정하게 맞춘 다짐 시료를 이용하여 입자 파쇄에 의한 입도의 변화가 투수계수에 미치는 영향을 평가하였다.

II. 분열 프랙탈 이론

분열이란 한 입자가 여러 조각으로 깨어지는 과

정으로, 서로 다른 크기를 가진 다중파쇄의 전달에 의해 생성된다. 분열은 과정에서 비율법칙을 적용한 반복알고리즘을 이용하여 생성되는 프랙탈 이론을 따른다. 이를 분열 프랙탈이라 하며 서로 다른 크기로 다중 파쇄에 의해 생성된 이질 재료들의 분열로 정의한다(Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1986; Perfect, 1997). 여러 개의 조각들로 구성된 섬들의 집합, 여러 크기의 광물입자들로 구성된 흙 등이 분열 프랙탈의 좋은 예이다(민과 이, 2003).

분열 프랙탈 차원을 흙 입자의 크기(입경)에 적용시키면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Tyler and Wheatcraft, 1992).

$$N(R \geq r) \propto r^{-D_f} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $N(R \geq r)$ = 입경 r 보다 큰 입자들의 총 개수
 D_f = 입도분포에 대한 프랙탈 차원

이는 개수와 입경의 관계에 대한 프랙탈 차원이 다. 하지만 흙에 대한 입도분석은 통과중량이 기준이 되기 때문에 입도분포를 통과중량으로 표현할 필요가 있다. 개수와 질량은 식 (2)와 같은 관계에 있고 총 중량에 대한 질량비는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dM \propto r^3 dN \dots\dots\dots (2)$$

$$M(r)/M \propto r^m \dots\dots\dots (3)$$

여기서, $M(r)$ = 입경이 r 보다 큰 입자들의 중량
 M = 입자들의 총 중량
 $m = \text{Log}(M(r)/M) - \text{Log}(r)$ 의 기울기

식 (2)와 식 (3)를 정리하면 식 (4)가 성립하며 질량에 대한 프랙탈 차원은 D_f 는 식 (5)와 같이 표현된다(Bittelli 등, 1999).

$$r^m \propto r^{3-D_f} \dots\dots\dots (4)$$

$$D_f = 3 - m \dots\dots\dots (5)$$

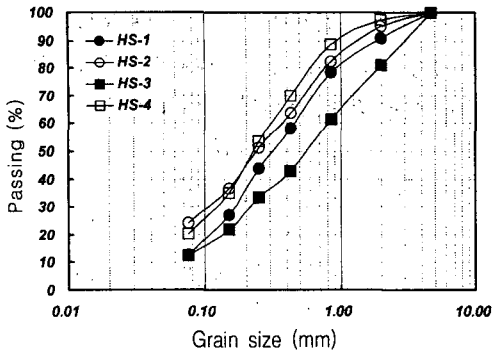


Fig. 1 Grain size distribution curves for 4 samples

III. 재료 및 시험 방법

1. 시험 재료

본 연구를 위해 경기도 화성시에서 심도와 위치가 서로 다른 총 4개소를 선정하여 시료를 채취하였다. 이 시료를 HS-1, HS-2, HS-3, HS-4로 구분하였고 원 시료에 대하여 입도분포시험을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 1과 같다.

2. 시험방법

다짐 및 투수 시험 후 입도분포분석을 실시할 경우, 미세 입자들의 흡착으로 인하여 입자의 크기가 과대평가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 세립분의 정확한 파악이 가능하고 동일조건으로 시험할

수 있는 수세법으로 입도분포시험을 실시하였다.

최적 함수비와 최대건조단위중량 파악을 위하여 KS F 2312 2001 표준 A 다짐을 실시하였다. 다짐 에너지가 미치는 영향을 파악하기 위해 표준 A 다짐 에너지의 50, 100, 200, 300%의 조건으로 다짐을 실시하였다.

본 연구에 사용된 시료는 세립분의 함량이 12.54~24.03%로 원 시료의 세립분 함량이 많고 다짐을 실시하였을 경우 세립분의 양이 더욱 증가할 것으로 예상되기 때문에 세립질 시료에 적합한 변수두 투수시험을 선택하였다. 시료성형 방법으로 일축압축시험 기기를 이용하여 압축하는 정적다짐 방법을 선택하였다. 정적다짐 시, 함수비와 단위중량은 각 시료별로 구한 최적 함수비와 최대건조단위중량을 적용하여 간극비를 일정하게 하였다. 정적다짐으로 인한 입자의 과쇄 유무를 판단하기 위해 다짐 전·후의 입도분포곡선을 비교하였다. 본 연구를 위하여 실시한 시험 조건을 Table 1에 정리하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 다짐시험

가. 실내다짐시험

HS-1~4 시료에 대한 실내다짐시험 결과, 최적 함수비는 각각 16.0, 19.2, 20.0, 20.3%로 나타났다.

Table 1 Conditions of tests

Classification	Method	Condition	Remark
Grain distribution	Washed	#4, 10, 20, 40, 60, 100, 200	KS F 2302, 2002
Compaction	Standard compaction test, A	-	KS F 2312, 2001
	Compaction energy increase	0(original), 50, 100, 200, 300%	Standard compaction energy
	Static compaction	1 cm/min (Min. velocity)	Using a unconfined compressive machine
Permeability	Falling head permeability test	-	KS F 2322 2000

Table 2 Results of standard compaction test

Sample	OMC (%)	$\gamma_{d\max}$ (kN/m^3)
HS-1	16.0	16.21
HS-2	19.2	17.02
HS-3	20.3	16.49
HS-4	20.0	16.01

다. 최대건조단위중량은 16.01~17.02 kN/m^3 의 분포를 보였다. 각 시료에 대한 실내다짐시험 결과는 Table 2에 정리하였다.

나. 다짐 에너지

시험 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 다짐 에너지가 50, 100, 200, 300%으로 증가함에 따라 건조단위중량이 증가하였다. 하지만 에너지가 클수

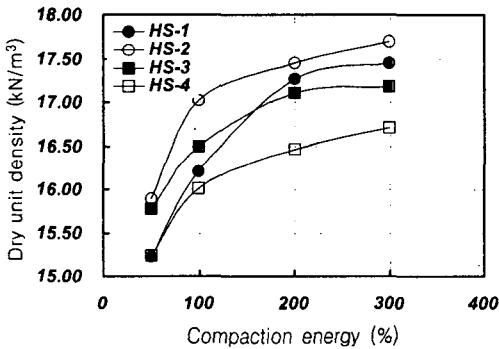


Fig. 2 Relationship between compaction energy and γ_d

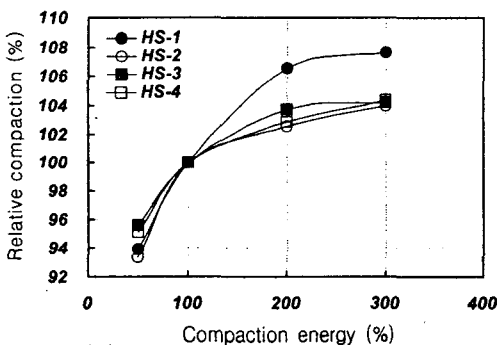


Fig. 3 Relationship between compaction energy and relative compaction

록 그 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 각 시료의 다짐 에너지에 대한 상대 다짐도(현 상태의 건조단위중량/최대건조단위중량×100)의 산출결과, 각 시료별로 93.95~107.67%, 93.38~103.97%, 95.66~104.21%, 95.15~104.36%로 나타났다. 다짐 에너지에 대하여 가장 민감하게 반응하는 시료는 HS-1이었으며, HS-2, HS-3, HS-4 시료는 상대 다짐도의 증가폭이 10% 내외로 비슷하였다(Fig. 3).

다. 정적 다짐

투수 시험을 위하여 동적 다짐으로 시료성형을 할 경우, 추가적인 파쇄가 발생할 가능성이 크고 일정한 단위중량으로 맞추기 힘들기 때문에 시료성형 방법으로 정적 다짐을 선택하였다. 정적다짐에는 일축압축시험기기를 이용하였으며 압축 속도는 최저 속도인 1 cm/min로 실시하였다. 하지만 과도한 압축력으로 인한 입자의 파쇄 가능성이 있어 이를 방지하고 파쇄여부를 확인하기 위해 다짐 전·후의 입도변화를 살펴보았다.

입도분포곡선의 비교결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 정적 다짐 전·후에 입도분포곡선의 차이가 크게 나타나지 않았다.

정적 다짐 전·후의 입도분포 차이를 정량적으로 분석하기 위하여 각 입도분포곡선의 프랙탈 차원을 산출하였다. 그 결과, 정적 다짐 전·후에 -

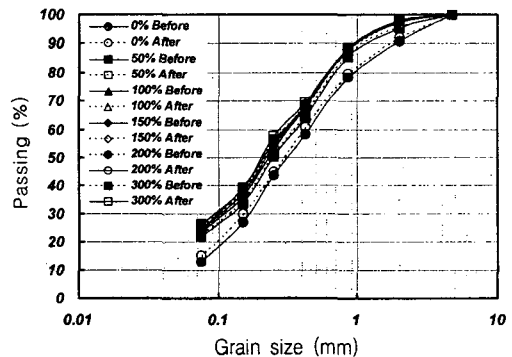


Fig. 4 Grain size distribution curve before and after static compaction

Table 3 Fractal dimension of grain size distribution curve before and after static compaction

Compaction energy increase (%)	Fractal dimension		
	Before	After	Δ F.D
0(original)	2.6111	2.6453	+0.0331
50	2.6340	2.6417	+0.0077
100	2.6506	2.6546	+0.0040
200	2.6679	2.6649	-0.0030
300	2.6726	2.6799	+0.0073

0.0030~0.0342의 프랙탈 차원 차이가 발생하였으나 그 차이가 작아 투수시험을 위한 다짐 방법으로 적합할 것으로 판단된다. Table 3은 정적 다짐 전·후의 프랙탈 차원을 나타낸다.

2. 입도분포분석

다짐 에너지가 입도에 미치는 영향은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 각 시료 마다 차이를 보이지만 전체적으로 다짐 에너지가 증가함에 따라 입도분포곡선이 위쪽으로 이동하게 된다. 이는 세립분이 증가하고 있는 것을 나타낸다.

3. 다짐 에너지별 입도분포곡선의 프랙탈 차원

프랙탈 차원의 산출 구간은 입도분포곡선의 모양이 크게 변하는 입경 0.85 mm를 기준으로 D_1 (0.85~4.25mm), D_2 (~0.85mm)을 산출하였다. D_{Total} 은 입도분포곡선 전체를 고려한 프랙탈 차원

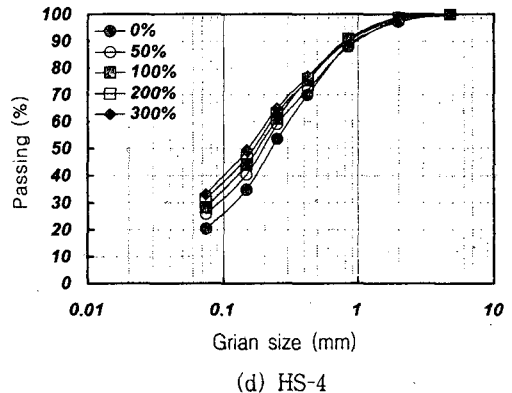
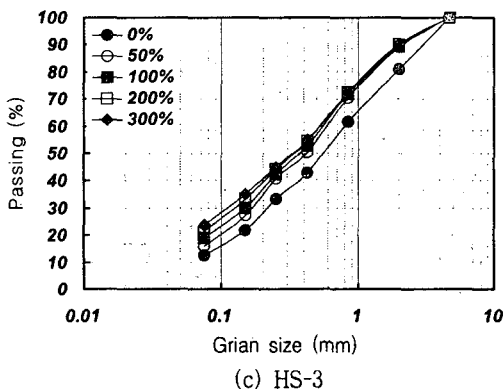
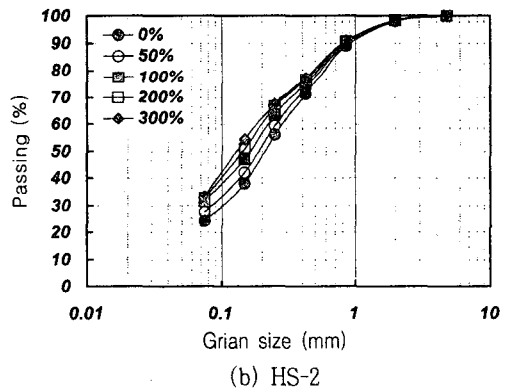
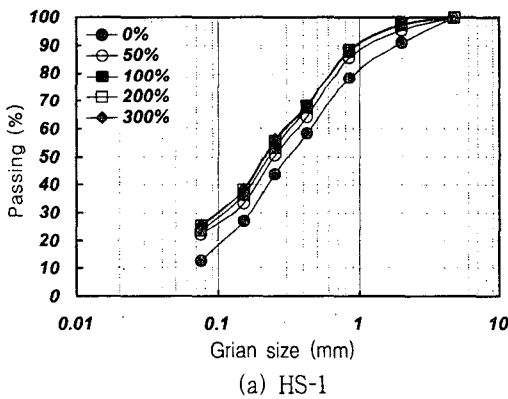


Fig. 5 Grain size distribution curves for compaction energy

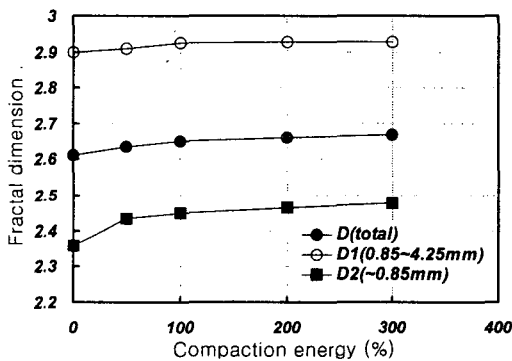
이다.

프랙탈 차원은 다짐 에너지 증가 시, 지속적으로 커지는 경향을 보이지만 에너지가 클수록 증가율이 감소한다. D_1 의 경우, D_{Total} , D_2 보다 증가율이 빠르게 감소하며 다짐 전·후의 차이가 작다. 이는 본 연구에 사용된 시료의 경우 입경 0.85 mm 이상의 입자가 차지하는 비율이 적어 다짐 에너지가 증가하여도 감소할 수 있는 범위가 작기 때문이다. 작은 입자(D_2)에서는 일반적으로 기울기(m) 값이 크기 때문에 큰 입자(D_1)보다는 프랙탈 차원이 작게 나타나기 때문에 그 증가폭이 크다. 또한 작은 입자(D_2)의 경우, 증가율의 감소가 높은 에너지에서 나타나는데 이는 입경 0.85 mm 이하의 입자

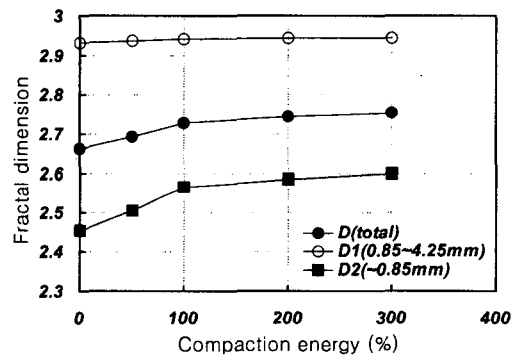
의 경우 큰 에너지가 가해질 때 입자의 파쇄가 발생한다는 것을 나타낸다. Fig. 6는 각 시료에 대한 다짐 에너지별 프랙탈 차원을 도시한 결과이다.

4. 프랙탈 차원과 상대 다짐도

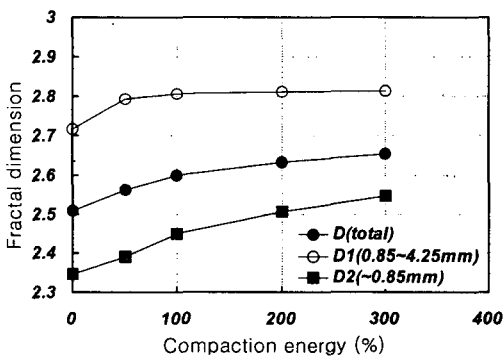
입도의 프랙탈 차원과 상대 다짐도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 비례관계를 보였다. 하지만 입도의 프랙탈 차원은 각 시료의 초기 프랙탈 차원(원시료 입도)에 영향을 받기 때문에 그 추세식의 차이가 나타난다. 추세식과 R^2 값은 Table 4에 정리하였다.



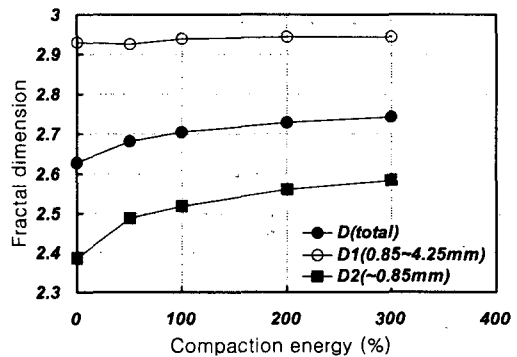
(a) HS-1



(b) HS-2



(c) HS-3



(d) HS-4

Fig. 6 Relationship between compaction energy and fractal dimension

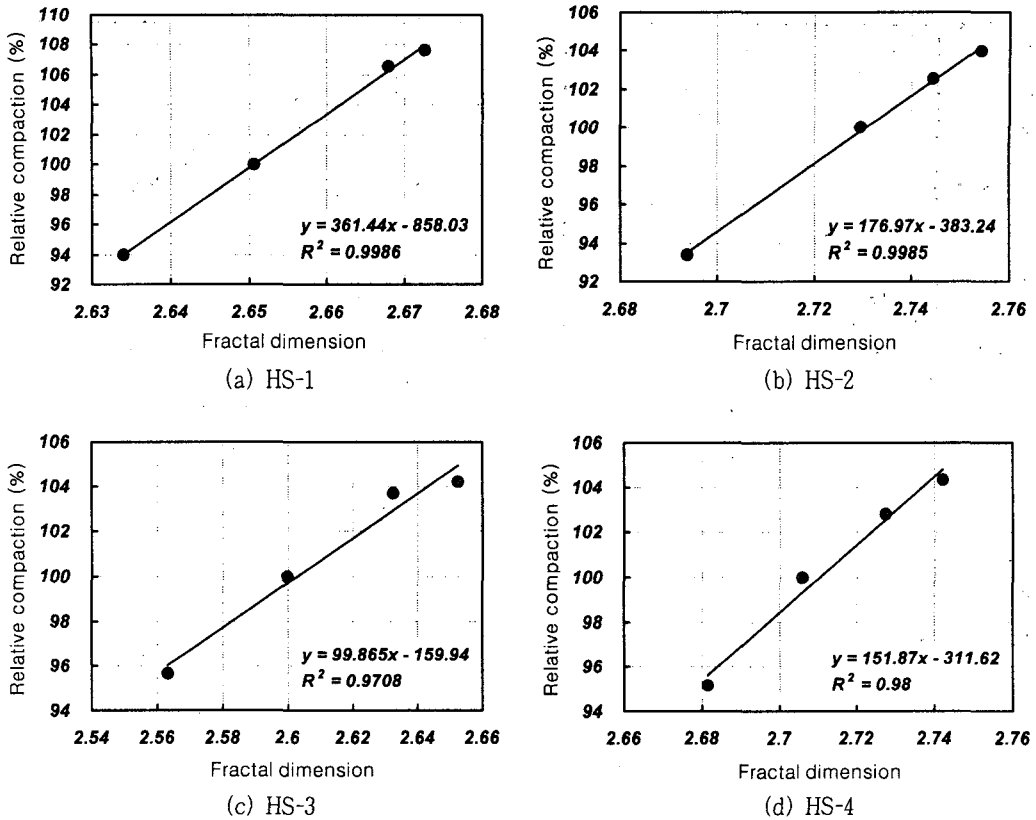


Fig. 7 Relationship between fractal dimension and relative compaction

Table 4 The function of relation between fractal dimension and relative compaction

Site	Function	R^2	Remark
HS-1	$y = 361.44x - 858.03$	0.9986	y : Relative compaction (%) x : Fractal dimension
HS-2	$y = 176.97x - 383.24$	0.9985	
HS-3	$y = 99.865x - 159.94$	0.9708	
HS-4	$y = 151.87x - 311.62$	0.9800	

5. 프랙탈 차원과 투수계수

에너지별 입도분포곡선의 프랙탈 차원과 투수계수를 비교한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 프랙탈 차원이 증가함에 따라 투수계수가 감소하는 것으로 나타났다. 투수계수는 프랙탈 차원의 거듭제곱에 반비례하였으며 그 추세식과 R^2 값은

Table 5에 정리하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 분열 프랙탈 차원을 이용하여 다짐 에너지가 입도에 미치는 영향과 그에 따른 투수계수의 변화를 분석하였다. 입도에 미치는 영향과

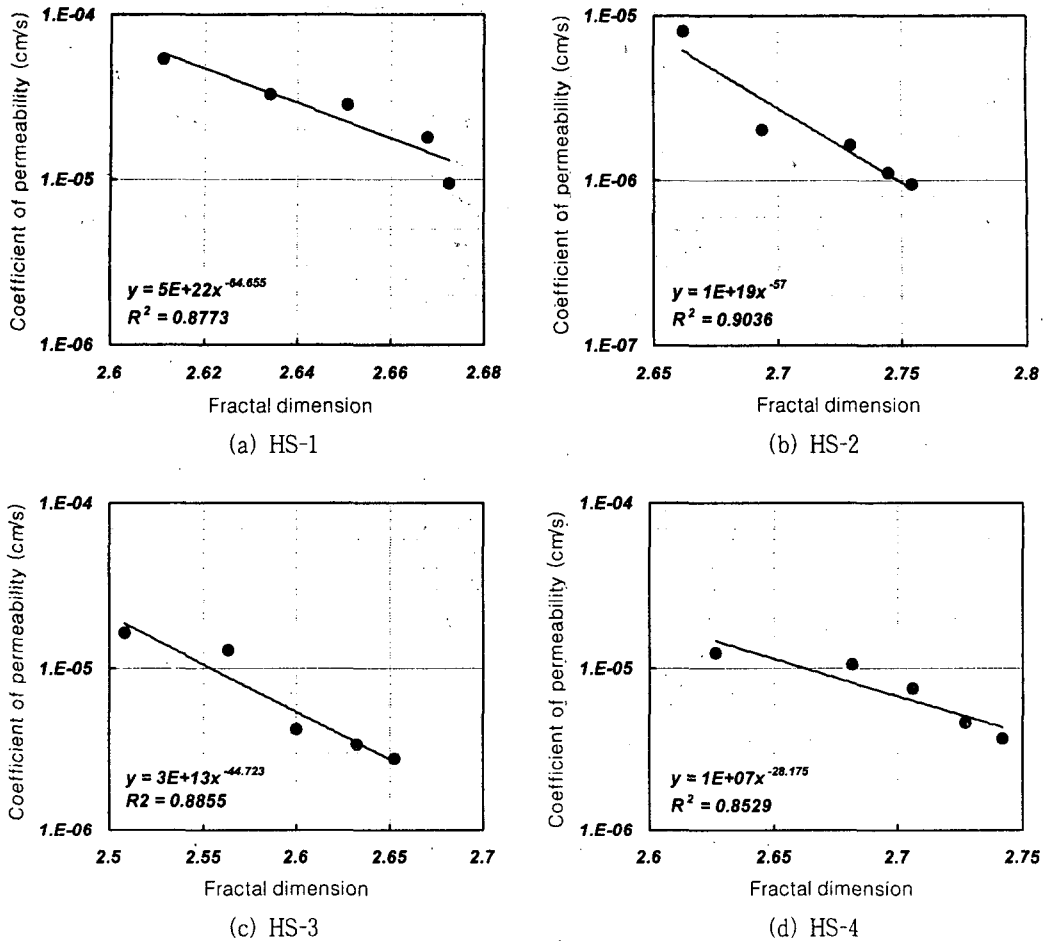


Fig 8 Relationship between fractal dimension and a coefficient of permeability

Table 5 The function of relation between fractal dimension and a coefficient of permeability

Site	Function	R^2	Remark
HS-1	$y = 5 \times 10^{22} \cdot x^{-64.655}$	0.8773	x : Fractal dimension y : A coefficient of permeability (cm/s)
HS-2	$y = 1 \times 10^{19} \cdot x^{-57.000}$	0.9036	
HS-3	$y = 3 \times 10^{13} \cdot x^{-44.723}$	0.8855	
HS-4	$y = 1 \times 10^7 \cdot x^{-28.175}$	0.8529	

악을 위하여 각 입도분포곡선에 대한 프랙탈 차원을 산출하였으며 산출된 프랙탈 차원과 다른 인자들을 비교, 분석하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 에너지별 실내다짐시험 결과, 다짐 에너지가 표준 A 다짐 에너지의 0~300%로 증가하는 동안 상대 다짐도가 시료별로 각각 93.95~107.67%, 93.38~103.97%, 95.66~104.21%, 95.15~104.36%

로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 투수시험을 위한 시료성형에 적용한 정적다짐의 경우, 다짐 전·후의 입도분포 차이가 매우 작고 다른 시험조건에 영향을 주지 않아 시험에 적합한 것으로 나타났다.

2. 에너지별로 다진 시료의 입도분포시험 결과 에너지가 증가함에 따라 세립분이 증가하는 추세를 보이며 에너지가 커질수록 그 증가율은 작아지는 것으로 나타났다. 입경 0.85 mm 이상의 프랙탈 차원은 변화의 폭이 작았으며 작은 다짐 에너지에서 증가율이 감소하였다. 총 입도에 대한 프랙탈 차원과 입경 0.85 mm 이하의 프랙탈 차원은 경향이 유사하였다.

3. 각 입도분포곡선에 대한 전체적 프랙탈 차원과 상대 다짐도 및 투수계수와의 비교결과, 상대 다짐도는 프랙탈 차원과 비례관계가 성립하며 투수계수의 경우 프랙탈 차원의 거듭 제곱에 반비례하는 것으로 나타났다. R^2 값은 각각 0.9708~0.9986, 0.8014~0.9896으로 높게 나타났다.

References

1. Bittelli, M., Cambell, G. S. and Flury, M., 1999, Characterization of particle-size distribution in soil with a fragmentation model, SSSAJ, 63: pp. 782-788
2. Bonala, Mohan V. S. and Reddi, Lakshmi N., 1999, Fractal representation of soil cohesion, ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, October: pp. 901-904
3. Fukumoto, 1992, Particle Breakage Characteristics of Granular Soil, Soil and Foundations, 32(1): pp. 26-40
4. Gori, U. and Mari, M., 2001, The correlation between the fractal dimension and internal friction angle of different granular materials, 41(6): pp. 17-23
5. Kim, Y. S., Lee, S. B., Jung, S. G., 1995, The engineering characteristics of weathered sedimentary rock soils - In Taegu and Kyung-pook Areas, Journal of Korean Geotechnical Society, 11(4): pp. 67-74
6. Lee, H. S., 1983, Permeability effect of decomposed granite soil under the influence of crushability and compaction energy, Journal of Korean Society of Civil Engineering, 3(3): pp. 107-116
7. Mandelbrot, B. B., 1982, The fractal geometry of nature, Freeman and co., San Francisco.
8. Min, T. K. and Lee, W. J., 2003, Fragmentation fractal analysis on particle-size distribution, Journal of Korean Geotechnical Society, 19(2): pp. 199-206
9. Min, T. K., Lee, W. J., Kim, J. H., 2004, The investigation on the particle crushing using the fragmentation fractal theory, Journal of Korean Society of Civil Engineering, 24(4C) : pp. 251-257
10. Pack, B. K., Lee, J. S., Lee, K. C., Moon, Y., 1998, The Breakable Properties Related to Wheathering Degree of Decomposed Granite Soils, Journal of Korean Society of Civil Engineering, 24(III-2): pp. 227-240
11. Pack, J. S., 2005, Estimation of permeability Coefficient using fractal dimension of particle size distribution curve in granular soils, Master Thesis, Seoul National University. (in Korean)
12. Perfect, E., 1997, Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: a review, Engineering Geology, Vol. 48, pp. 185-198
13. Turcotte, D. L., 1986, Fractal and fragmentation, Journal of Geophysics research, 91: pp. 1921-1926
14. Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W., 1992, Fractal scaling of soil particle-size distribution: analysis an limitation, SSSAJ, 56: pp. 362-369